Experimentelle Untersuchungen

über die

Bewegungen der Trachea.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

der hohen medizinischen Fakultät

der

Königl. bayr. Friedrich-Alexanders-Universität Erlangen

im Mai 1893

vorgelegt von

Ludwig Hódosi,
cand. med. aus Budapest.

Erlangen, 1893.

Druck der Universitäts-Buchdruckerei von E. Th. Jacob.

Gedruckt mit Genehmigung der hohen medizinischen Fakultät zu Erlangen.

Referent: Prof. Dr. Rosenthal.

Dass die Luftröhre während der Respiration gewisse Bewegungen ausführe, war ziemlich lange unbekannt, und es ist dies ein Gegenstand, den auch heute die anatomischen und physiologischen Lehrbücher fast gar nicht berühren.

Experimentelle Untersuchungen über die Dehnbarkeit und Kontraktilität der Luftröhre finden wir überhaupt nur bei zwei Autoren. Harless in München versuchte die Exkursionsfähigkeit derselben experimentell festzustellen (Handwörterbuch der Physiologie von R. Wagner 1852), und in neuerer Zeit untersuchte diesen Gegenstand Alexis Horvath (Pflüger's Archiv 1876; zur Physiologie der Respiration), jedoch von einem ganz anderen Gesichtspunkte aus als Harless. Abgesehen von diesen zwei Arbeiten, von denen die erstere ziemlich unbekannt blieb, die andere auch wenig Anregung zum Weiterforschen gab, wurde der in denselben behandelte interessante Gegenstand nicht weiter studirt.

Es ist einleuchtend, dass die Luftröhre, die bei den Bewegungen des Halses, beim Auf- und Absteigen des Schlundes und des Kehlkopfes gewisse Lageveränderungen zu machen genötigt ist, so beschaffen sein muss, dass sie sich diesen Verhältnissen anpassen kann. Thatsächlich ist sie auch so gebaut, dass sie eine gewisse Dehnbarkeit der Länge nach besitzt und dabei dennoch eine Resistenz, damit sie sich nicht verflacht und einen Teil ihres Lumens einbüsst.

Dies erwähnen auch die anatomischen Handbücher, indem sie darauf hinweisen, dass durch die Knorpelringe die Resistenz zur Erhaltung des Lumens, durch die Möglichkeit der Annäherung und Entfernung dieser Ringe unter einander die Ausdehnbarkeit der Trachea gegeben ist.

Sehr zutreffend macht Luschka den Vergleich, dass man durch eine weiche Luftröhre eben so wenig atmen könnte, als man durch eine dünnwandige lange Gummiröhre Luft einziehen kann, weil bei diesem Versuche der äussere Luftdruck die weichen dünnen Wände eindrückt. Nichtsdestoweniger scheint Luschka von der Dehnbarkeit und den Bewegungen der Luftröhre keine richtige Vorstellung zu haben; er schreibt der Trachea nur eine gewisse Elastizität zu, damit sie sich stets dem Luftdrucke anpasse. Er macht nämlich an anderer Stelle folgende Bemerkung: Ueber die Wirkung des M. crico-thyreoideus sind zum Theil sehr sonderbare Vorstellungen gehegt worden; so von Arnold (Freiburg 1847): der M. crico-thyreoideus nähere den vorderen Teil des Ringknorpels dem Schildknorpel („wobei er doch wohl die Luftröhre mit in die Höhe ziehen müsste!").

Für den gewiegten Anatomen Luschka war es eine absonderliche Vorstellung, dass die Luftröhre in die Höhe gezogen werden könne, und dennoch entspricht gerade dieses Verhalten den Thatsachen, und es scheint also, dass Luschka ebenso wie den anderen Anatomen die Untersuchungen von Harless unbekannt geblieben sind.

Harless mass nun mit seinen Vorrichtungen, nämlich mittelst Fernrohr, in dessen Ocular ein Fadenkreuz und Micrometer sich befand, die Erhebungen des Kehlkopfes für die gewöhnliche Atmung und für tönende Exspiration. Der zu Beobachtende steht dabei in einer Fensternische, mit dem Rücken angelehnt und mit fixiertem Kopfe, 2 Klafter weit vom Fernrohr entfernt. Bei vollkommen ruhiger Atmung liess sich kaum irgend eine messbare Bewegung wahrnehmen, bei forcirter Respiration schwankte die Bewegung zwischen 4—6 mm auf und ab. Bei der tönenden Exspiration wurde gefunden: vom Ruhepunkte des Kehlkopfes bis zur Produktion des höchstens Gesangstones eine Erhebung der Trachea um 20 mm, und vom Ruhepunkte bis zur Produktion des tiefsten Tones eine Abwärtsbewegung von ebenfalls 20 mm. Im ganzen war es daher ein Spielraum von 40 mm, inner-

halb dessen sich der Kehlkopf auf und abwärts bewegte. Harless benützt nun die hier angeführten Messungen zu dem Beweiss, dass die Luftröhre beim Lebenden nicht blos gedehnt und erschlafft, sondern zu gleicher Zeit auch im Ganzen auf- und abgeschoben werden muss: „denn eine jener Verschiebung des obersten Luftröhrenpunktes entsprechende Dehnung dürfte an der Leiche nicht herbeizuführen, gewiss auch nicht bei dem Lebenden vorauszusetzen sein.“ Harless hat an verschiedenen Leichen beiderlei Geschlechtes diejenige procentische Verlängerung der Luftröhre gemessen, welche durch stärksten Zug an ihr hervorgerufen werden kann, und hat bei Männern durchschnittlich 32,6 $^0/_0$ bei Weibern 28 $^0/_0$ als äusserste Grenze der möglichen Verlängerung gefunden. (Liscovius fand 25 $^0/_0$).

Setzt man nun die Länge der Luftröhre im erschlafften Zustande zu 90 mm an, so kann man höchstens annehmen, dass eine Verlängerung von 26 mm eintreten könne, und der Rest der Aufwärtsbewegung im Umfange von 14 mm. durch ein Verschieben der ganzen Luftröhre samt den Kehlkopfe zustande gebracht werden müsse.

Diese Verschiebung der Luftröhre könnte nur mit einer gleichzeitigen Verschiebung der Thoraxeingeweide, also mit einem Hoch- und Tiefstande des Zwerchfelles einhergehen. Dieses behauptet Liscovius (Liscovius, Physiol., Leipzig 1846), indem er von den Exkursionen des Kehlkopfes sagt, dieselben kämen ohne Zuthun seiner Hebe- und Senkmuskeln lediglich durch Hebung und Senkung des Zwerchfelles zustande.

Die andere Eingangs erwähnte Arbeit von Alexis Horvath befasst sich mit den Kontraktionen der Trachea, welche durch die quer verlaufenden, an den hinteren Enden der Knorpelringe inserirten glatten Muskelfasern zustande kommen. Er fand, dass in erwärmtem, defibrinirtem Blute suspendierte Luftröhren noch lange nach dem Tode des Tieres selbständige und rythmische Kontraktionen ausführen, die man ausserdem noch mit dem faradischen Strome auslösen

kann. Diese Kontraktionen, die offenbar auch an den Bronchialverzweigungen vorkommen, können das Lumen der Luftröhre nicht unmerklich (manometrisch messbar) verengern, und können somit als Regulatoren des Windrohres bei Atmung und Stimmbildung betrachtet werden.

Die von mir ausgeführten Versuche nun sind geeignet, diejenigen von Harless grösstenteils zu bestätigen und ergeben weiters auch die im Folgenden zu schildernden neuen Einzelheiten. Wenn dieselben auch nicht von besonderer praktischer Wichtigkeit sind, so möchten sie doch einiges wissenschaftliche Interesse bieten, zumal dieser Gegenstand seit Harless nicht mehr behandelt oder studirt worden ist.

Präpariert man bei einem Hunde den Larynx und den Halsteil der Luftröhre frei, nachdem man das Tier vorher mässig narkotisiert hat (durch Chloroform oder durch Morphium-Injektion in die Vena jug.), so sieht man bei aufmerksamer Betrachtung ohne Schwierigkeit die folgenden Verhältnisse: Beim ruhigen Atmen bewegt sich der Kehlkopf wenig, ungefähr um 2 mm auf- und abwärts. Diese Bewegung wird nicht durch den Schildknorpel, sondern durch den Ringknorpel ausgeführt, der sich stets zum Schildknorpel erhebt, während letzterer nahezu still stehen bleibt. Dabei sieht man ein geringes Auf- und Abgleiten der Luftröhre, nicht unähnlich den peristaltischen Bewegungen des Darmrohres. Atmet das Thier heftiger oder fängt es (wie in der leichten Narkose sehr oft) zu stöhnen, oder leicht zu schreien an, dann werden diese Bewegungen etwas umfangreicher. Beim Stöhnen hebt sich schon der ganze Larynx, also auch der Schildknorpel; jedoch viel ausgiebiger noch der Ringknorpel. Dieser letztere wird durch die gut sichtbaren Kontraktionen des M. crico-thyreoideus zu dem Schildknorpel emporgehoben, wodurch der Zwischenraum zwischen Schild- und Ringknorpel zum Verschwinden gebracht wird. Die Luftröhre verschiebt sich nun viel merklicher, hebt sich bei der Exspiration und senkt sich ebenso wie der Larynx bei der

Inspiration. Die oberen Luftröhrenringe scheinen hierbei etwas mehr beteiligt zu sein, am meisten der Ringknorpel, welcher sich um circa 12 mm erhebt. Von dieser Erhebung kann man sich einfach dadurch überzeugen, dass man sich am Knorpel einen Strich mit Tinte macht, und an der gut angelegten Millimeterscala die Exkursion abliest. — Sticht man in den Knorpel eine Nadel ein, um die Erhebung besser zu veranschaulichen, ev. auch graphisch aufzunehmen, so erhält man falsche Masse, indem der Ringknorpel sich nicht blos nach oben verschiebt, sondern auch um die Queraxe rotiert; infolge dessen würde die vertikale Bewegung des oberen Nadelendes mit einer Kreisbewegung kompliciert sein.

Während nun der Ringknorpel beim leichten Stöhnen des Tieres um circa 12—14 mm in die Höhe (zum Kopfe zu) geht, findet man, dass der Schildknorpel dabei nur ungefähr 4—6 mm hoch gehoben wird. Dies ist offenbar so zu deuten, dass bei dieser Bewegung der Larynx in toto durch seinen Hebemuskel (M. thyreo-hyoid.) um etwa 6 mm höher gehoben wurde, wobei der Angriffspunkt der Schildknorpel ist; der Ringknorpel aber, der dieser Erhebung des ganzen Larynx passiv folgen muss, schmiegt sich ausserdem noch durch Kontraktion des M. crico-thyreoideus an den Schildknorpel an, und macht ausser der passiven Erhebung von 6 mm seinerseits eine Exkursion von 6—8 mm.

Ermöglicht wird ihm dieses Verhalten durch seine leichte Beweglichkeit; die an den Kehlkopf angreifenden Halsmuskeln inserieren sich an dem Schildknorpel, sie fixieren also bei Hebung (thyreo-hyoid.) oder Senkung (sterno-thyreoid.) immer nur diesen, während der Ringknorpel davon ganz frei und so in relativer Beweglichkeit verbleibt.

Für die Luftröhre ist natürlich nicht die Bewegung des ganzen Kehlkopfes, sondern die des Ringknorpels ausschlaggebend; denn dieselbe folgt immer nur dem Zuge, der an ihr ausgeübt wird, sie folgt also dem obersten Trachealringe, d. h. dem Ringknorpel. Wenn sich nun sämmtliche Ringe der Trachea bei der Exspiration oder bei der

Stimmbildung nach oben bewegen, so kann es noch die Frage sein, ob diess eine einfache Verlängerung, oder ein Verschieben der ganzen Luftröhre bedeutet, da ja doch mit den Respirationsbewegungen an der Trachea die Bewegungen des Zwerchfelles zusammenfallen, und zwar gerade mit der Inspiration, also Senkung der Trachea, Tiefstand des Zwerchfelles, mit der Exspiration oder Stimmbildung, also Erhebung der Trachea, eine Erhebung des Zwerchfelles zusammenfällt.

Dass das Diaphragma in dieser Weise die Luftröhre mit dem Thoraxinhalt hinaufverschiebe, ist schon von vorne herein unwahrscheinlich und wurde auch von Harless verneint; denn derselbe sah bei Leichen durch Empordrängen des Zwerchfelles keine Verschiebung des Halsteiles der Luftröhre, „deren Ringe sich ja eher einander nähern, als dass das ganze Gewicht samt Schilddrüse nach vorne geschoben werden sollte!“

Ich führe folgende Tierversuche speziell an.

Mittelgrosse braune Hündin.

Der freipräparirte Kehlkopf mit Luftröhre bewegt sich beim ruhigen Atmen um 2 mm auf- und abwärts; die Kehlkopfbewegungen beziehen sich da nur auf den Ringknorpel. Bei Unruhe des Tieres erhebt sich der Kehlkopf (Ringknorpel) und die Luftröhre um 1 cm. Die Luftröhre ist dabei samt den Halsteilen des Tieres in mässiger Spannung, was durch das Fesseln des Tieres bedingt ist. Beim lauten Schreien, wie es trotz Narkose vorkam, und bei tiefer Inspiration, die mit den stossweise erfolgenden Stimmexplosionen abwechselte, wurde der Stand des Ringknorpels an der unverrückbar in ein Stativ geklemmten Scala abgelesen; die Exkursion betrug 16 mm. Beim Schlucken des Tieres, das manchmal spontan ausgeführt wurde, betrug die Erhebung des Kehlkopfes ungefähr 2 mm. Die Luftröhre resp. die einzelnen Ringe folgten dieser Zerrung.

Die Luftröhre wird nun 2 cm unterhalb des Ringknorpels quer durchtrennt, wobei man die M. recurrentes vorerst frei zu präparieren hat, um sie nicht zu verletzen. Sofort nach

der Durchtrennung ziehen sich beide Stümpfe zurück; der obere kaum merklich, der untere aber ganz bedeutend, sodass ein Abstand von circa 20 mm zwischen den zwei Stümpfen entsteht. Das Tier atmet nun durch den unteren Stumpf; trotzdem finden die rythmischen Respirationsbewegungen am Kehlkopfe weiter statt, und der obere Stumpf, der am Larynx hängt, folgt diesen, wenn auch geringen Bewegungen; ebenso auch beim Schlucken. Phonation ist nicht mehr möglich; freilich sind diese kleinen Bewegungen dieses 1 cm langen Tracheaabschnittes bei weitem nicht so augenfällig, als wenn man die intakte Trachea vor sich sieht. Der untere retrahierte Stumpf führt gar keine sichtbaren Bewegungen aus, sondern verharrt in Ruhe.

Dem getöteten Tiere wird die ganze Luftröhre entnommen. Länge 14 cm. — Ein 10 cm langes Stück wird durch Zug ausgedehnt, und lässt sich, ohne sich zusammenzulegen, auf 13,5 cm ausdehnen. Dabei erweist sich die Trachea als sehr resistent und lässt sich kaum mit Gewalt zerreissen.

Werden jetzt die beiden Endknorpel des Stückes mit Pinzetten gefasst und auseinander gezogen, so sieht man, wie die Trachea einen nach vorne konvexen Bogen beschreibt. Dieses kommt dadurch zustande, dass die Ringe im vorderen Teile des Rohres mehr dem Zuge nachgeben, als hinten der fibröse Strang. Denn fasst man mit den Pinzetten die beiden Enden des Stückes so, dass nicht die vordere Seite, sondern die hintere fibröse Fläche eingeklemmt wird, so kommt diese Ausbauchung nicht zustande. Der hintere fibröse Anteil der Trachea ist also resistenter und verhindert das excessive Auseinanderweichen der Ringe. — Schneidet man hinten in die Röhre ein, so gehen die Knorpelspangen gleich auseinander und der Schnitt klafft sehr stark, so dass die hinten durchschnittene Trachea sich zu einer Rinne öffnet (eine auch von Horvath beschriebene Erscheinung). — Wird vorne in die Knorpel eingeschnitten, so bleiben die

Schnittränder an einander liegen unter Bildung eines spitzen Winkels.

Die Trachealringe sind also einer konstanten Spannung unterworfen; ihre hinteren Verbindungen weichen auseinander, sobald sie gelöst werden; ausserdem ist die Luftröhre im ganzen am Lebenden immer mässig gespannt; denn bei queren Durchtrennungen ziehen sich beide Stümpfe rasch zurück, einen ganz bedeutenden Abstand zwischen sich lassend.

Es ist also die Hundetrachea bei einer Länge von ungefähr 14 cm (bei grösseren Tieren länger) um 35 % ihrer Länge ausziehbar, könnte also in extremen Fällen bei lebenden Tieren bis zur Länge von 20 cm ausgedehnt werden, ohne wesentlich an ihrem Lumen zu verlieren. Eine so extreme Verlängerung kommt offenbar nicht vor, denn wir haben bei lauten Explosionen der Stimme und bei Schluckbewegungen eine Aufwärtsbewegung nur von ungefähr 2 cm beobachtet; nimmt man nun dazu, dass die Trachea durch die Fesselung des Tieres mit gestrecktem Halse schon eine Dehnung von ca. 1 cm erfahren hat, so ergibt sich, dass zu einer Lokomotion des Kehlkopfes von 3 cm die Elastizität der Trachea mehr als genug ist. Mehr als 1 cm auf Rechnung der Lage des Tieres zu setzen, ist kein Grund vorhanden; der Grad des Klaffens an der Tracheawunde sowie der Umstand, dass die Bewegungen der freipräparierten Trachea sichtlich ganz unbehindert stattfinden, deuten vielmehr an, dass die durch die Fesselung verursachte Dehnung keineswegs bedeutend sein kann. Zieht man ferner noch in Betracht, dass der untere Tracheastumpf keine Bewegungen macht, so kann man sagen, dass bei Hunden die Bewegungen der Trachea vom Tief- und Hochstand des Zwerchfelles unabhängig stattfinden, und den Larynxbewegungen blos in Folge der Dehnbarkeit der Trachea folgen.

Davon etwas verschieden erweisen sich die Verhältnisse beim Kaninchen.

Präpariert man bei einem Kaninchen Larynx und Trachea frei, so sieht man zwar ebenfalls, dass die Luftröhre den Kehlkopfbewegungen Folge leistet. Ausserdem kann man aber sehen, dass die dem Jugulum zunächst gelegenen Ringe bei der Inspiration mehr nach unten (der Brust zu) gezogen werden, als die weiter oben befindlichen. Die Larynxbewegungen sind überhaupt ganz geringe, der Ringknorpel wird kaum zum Schildknorpel gezogen.

Reizt man bei dem Tiere den nervus vagus, so kann man zahlreiche Schluckbewegungen auslösen. Es wird beim Schlingakte der Larynx nach oben herangezogen, aber — relativ — nicht in so hohem Masse als beim Hunde, denn es hebt sich dabei hauptsächlich das Zungenbein; man sieht genau, dass sich die membrana hyo-thyreoidea stark anspannt, indem der Kehlkopf sich viel weniger hebt, als das Zungenbein; der Zug auf die Luftröhre ist also nicht so gross, als er es wäre, wenn nicht die membrana hyo-thyreoidea einen Teil der Dehnung auf sich nehmen würde. Zum Schreien wurden die Tiere nicht gebracht. — Die Masse der Exkursionen sind folgende (wegen der kleinen Dimensionen nicht vollkommen genau): Bei ruhiger Inspiration gehen die dem Jugulum zunächst gelegenen Ringe um etwa 1 mm tiefer, bei ausgiebiger Inspiration — nach dem Nachlassen der Vagusreizung*) — um 1½ mm, während die oberen Ringe noch weniger Locomotion zeigen.

Beim Schlingen wird die Trachea um etwa 6—8 mm gedehnt, und um nicht viel weniger die membrana hyothyreoidea.

Ich schnitt nun die Trachea ½ cm unter dem Larynx quer durch, worauf sich beide Stümpfe, der untere weit mehr, zurückzogen und eine Spalte von 1 cm Höhe zurückblieb. Der obere Stumpf folgt nun den minimalen Larynxbewegungen.

*) Vagus wird neben der Carotis aufgesucht.

während der untere ebenfalls ganz kleine Bewegungen mit der Respiration vollführt. Besser kann man die letzteren beobachten, wenn man den unteren Stumpf mit der Pinzette fasst und ganz mässig hervorzieht: man sieht dann ganz deutlich, wie synchron mit der Inspiration Abwärtsverschiebungen der Ringe innerhalb kleiner Dimensionen (circa 1 mm) stattfinden.

Dem getöteten Tiere wird die ganze Trachea entnommen und samt dem oberen Stumpfe gemessen. Die Länge betrug 37 mm. Das untere 32 mm lange Stück kann mit mässigem Zuge um 10 mm ausgedehnt werden, und schnellt beim Nachlassen des Zuges mit der Pinzette in die frühere Lage zurück. Grössere Ausdehnungen verträgt die Röhre nicht mehr gut: sie kann wohl bis auf 50 mm gedehnt werden, verflacht sich aber dabei, und geht beim Nachlassen des Zuges nicht mehr ganz in die frühere Lage zurück, sondern bleibt um 2 mm ausgedehnt. Wird sie noch mehr gedehnt, so reisst sie. Die ganze Trachea kann somit auf 60 mm ausgezogen werden, ohne zu reissen, und um circa 30 % gedehnt werden, ohne die Form und Elastizität zu verlieren. 30 % ist aber schon die äusserste Grenze, über welcher sie schon an ihrer Elastizität geschädigt wird.

Man kann also sagen, dass die 37 mm lange Trachea sehr wohl geeignet ist eine Dehnung von 10–11 mm, aber nicht mehr, im lebenden Tiere zu vertragen.

Wird in die Luftröhre an der hinteren Wand der Länge nach eingeschnitten, so findet man, ganz wie beim Hunde, ein bedeutendes Klaffen der Wunde, die entfesselten Knorpelspangen gehen weit auseinander. Wird vorne eingeschnitten (der Knorpelring in zwei Hälften getrennt), so legen sich die Ränder an einander, und bilden eine Spitze. Die Ringe sind also auch hier durch die hinten inserierten glatten Muskelfasern und den Bandapparat in steter Spannung gehalten.

Ich habe diese Versuche noch an einigen weiteren Kaninchen ausgeführt. Die Länge der Trachea variierte dabei zwischen 31—39 mm. Eine frische Trachea wurde dann am

oberen Ende eingeklemmt, in ein Stativ gehängt und am unteren Ende mit Gewichten belastet. Schon ein Gewicht von 15 gr dehnte das 31 mm lange Rohr bis 57 mm, nach der Entlastung blieb es 33 mm lang. — 25 gr Belastung dehnte es auf 59 mm, nach Entlastung blieb es 34 mm lang. Gut vertragen hat die Luftröhre Lasten von 5—8 gr, die sie bis auf 39—41 mm auszogen, also um circa 30 %. Auf Belastung mit 50 gr hin erfolgte Reissen des Rohres, und zwar rissen dabei immer die untersten Knorpel von den oberen ab, und immer verflachte sich der untere Abschnitt eher als der obere. Mithin ist der obere Luftröhrenabschnitt resistenter und elastischer als der untere.

Wir fanden also beim Kaninchen, dass die Luftröhre nicht bloss den Kehlkopfbewegungen, sondern vornehmlich auch den Diaphragmabewegungen folgt; dieser Umstand hängt offenbar von der Respirationsart dieser Tiere ab, die vorwiegend abdominal ist.

Die Bewegungen finden innerhalb solcher Grenzen statt, für welche die blosse Dehnbarkeit der Trachea mehr als genügend ist, so dass die Trachea im Ganzen nicht auf- und abgeschoben werden muss.

Ich habe auch noch bei einer Taube die Luftröhre untersucht. Sie folgt den Bewegungen des Kohlkopfes oder besser gesagt Luftröhreneinganges. Wird sie 2 cm unterhalb desselben quer durchtrennt, so zieht sich der untere Stumpf stark zurück; während nun nur der obere Stumpf Respirationsbewegungen macht, wird der untere gar nicht verschoben.

Die Luftröhre hat die im Verhältnis zum Tiere enorme Länge von 8 cm. Das untere 6 cm lange Stück kann um 20 mm ausgezogen werden und reisst bei 85 mm. Das obere 2 cm lange Stück ist resistenter und elastischer; auf 25 mm ausgezogen schnellt es in die frühere Lage zurück, kann aber auf 30 mm (also um 50 %) ausgezogen werden, bis es zu reissen beginnt. Das ganze 8 cm lange Rohr hat also

für seine Dehnung einen Spielraum bis zu $10^1/_2$ cm, ohne Schaden zu nehmen. Die $2^1/_2$ cm betragende Länge für die Respirationsbewegungen der Trachea der Taube ist eine enorme und dient offenbar dazu, dass sich dieselben den Drehbewegungen des Halses mit Leichtigkeit anzupassen vermögen.

Wir finden also bei den untersuchten Tiergattungen, dass die Luftröhre genügende Elastizität und Dehnbarkeit besitzt, um sich den veränderten Verhältnissen der In- und Exspiration anzubequemen, und dass bei Tieren mit vorwiegend abdominaler Respiration die Luftröhre sich nach unten zu dem Diaphragmastande, bei Tieren mit pectoraler Respiration nach oben dem Niveau des Ringknorpels gut anpassen kann, lediglich dadurch, dass die Ringe etwas auseinanderweichen und ganz ohne dass eine Verschiebung der Trachea nötig wäre.

Was nun die Verhältnisse beim Menschen betrifft, so ergibt sich aus den Messungen bei Harless, dass die Dehnbarkeit der Luftröhre im Durchschnitte 29 $^0/_0$ beträgt. Diese Durchschnittsziffer ist aber das Mittel von ziemlich grossen individuellen Schwankungen, als deren Minimum der Dehnbarkeit Harless 17 $^0/_0$ fand, als deren Maximum 41 $^0/_0$. — Bei einer Länge der Luftröhre von $9^1/_2$ cm würde diese maximale prozentische Dehnbarkeit eine ungefähr 40 mm betragende Verlängerung ergeben, eine Differenz, innerhalb welcher bei Harless' Beobachtungen der Kehlkopf vom tiefsten bis höchsten Stande variierte.

Uebrigens muss gesagt werden, dass die Messungen von Harless keinen Anspruch auf absolute Genauigkeit haben, da ja durch das Fernrohr nur ein Punkt am Halse beobachtet wurde, der Kehlkopf aber unter der Haut eine Verschieblichkeit besitzt.

Ausserdem dürften die wenigsten Menschen jenen stimmlichen Anforderungen entsprechen, die Harless an seine Versuchsobjekte stellen durfte, um eine Exkursion des Larynx in so weiten Grenzen zu erzielen.

Es ist auch folgendes zu erwägen: Die Trachea kann nicht nur ausgedehnt, sondern auch über ihre Abspannung zusammengeschoben werden. Diess muss offenbar bei Produktion der tiefsten Töne geschehen. Denn der Kehlkopf steigt vom Nullpunkte (d. h. von der Höhe bei vollständiger Ruhe) nach abwärts, wenn tiefe Töne gesungen werden. Bei diesem Akte steht das Zwerchfell keineswegs tiefer, sondern sogar etwas höher, denn die Lungen befinden sich im Ausatmungszustand.

Für die Schwankungen des Kehlkopfes muss also nicht bloss die Ausdehnbarkeit, sondern auch die mögliche Verkürzung mit Abspannung seitens der Trachea zur Erklärung herangezogen werden.

Da wird es nun im hohen Grade wahrscheinlich, dass beim Menschen ebenso wie beim Tiere keine Verschiebung der ganzen Luftröhre stattzufinden braucht, sondern dass die Elastizität desselben genügenden Spielraum bietet.

Das einfachste physiologische Experiment dafür ist folgendes:

Beim Schlucken erhebt sich der Kehlkopf ziemlich hoch, viel höher, als sonst beim forciertem Atmen, Sprechen oder Singen, vielleicht mit Ausnahme der höchsten Töne. — Nun folgt die Luftröhre dem Zuge des Kehlkopfes bei dieser Erhebung, ohne dass sie sich im ganzen zu verschieben brauchte, denn das Zwerchfell erhebt sich nicht; im Gegenteil, es senkt sich zumeist. So z. B.: Wenn wir Wasser trinken wollen, machen wir vor allem eine tiefe Inspiration, das Zwerchfell geht hinunter, und es erfolgen dann die Schluckbewegungen mit Erhebungen des Kehlkopfes.

Die Trachea gibt also nach beiden Richtungen hin nach. Es unterliegt keinem Zweifel, dass ihre Dehnbarkeit dazu genügt, bei Tiefstand des Zwerchfelles ausgiebige Kehlkopferhebungen zu ermöglichen; dabei liegen die anatomischen Verhältnisse so, dass eine Verschiebung der Trachea in toto nach oben oder unten ausgeschlossen ist, denn von beiden Seiten wird an ihr gezogen.

Wir können daher sagen, dass beim Menschen die Trachea sowohl den Respirations- wie den Phonationsbewegungen des Kehlkopfes lediglich vermöge ihrer Elastizität, unabhängig vom Zwerchfellstande, folgt, dass ein Verschieben der Trachea nicht stattfindet.

Allerdings wollen wir dahin gestellt sein lassen, ob nicht bei der Produktion der höchsten Gesangstöne der ohnehin erhöhte Stand des Zwerchfelles und der noch durch die Wirkung der Bauchmuskeln emporgedrängten Brustorgane der Anpassung der Trachea an diese Leistung zu statten kommt.